

スマートフォンのOLED画面を利用した 空間分割多重低輝度 アップリンク可視光通信

川出 有紗, 中條 渉, 小林 健太郎

名城大学 大学院 理工学研究科 電気電子工学専攻

目次

1. 研究背景・研究目的
2. シンボル間干渉
3. 適応閾値処理の原理
4. 通信実験の条件
5. 通信実験の結果
6. 考察と改善実験
7. 結論・今後の課題

研究背景:ダウンリンクとアップリンクによる双方向の可視光通信(OCC)

- 電波資源の逼迫や電波の干渉を解決するため、可視光通信(OCC)の研究が進められている。

- 電波に比べ指向性が高く、光の届く範囲も限定されているため通信秘匿性がある。

- 電波を用いていないため免許や混信の心配がなく、安価・小型で手軽に複数の機器を設置可能

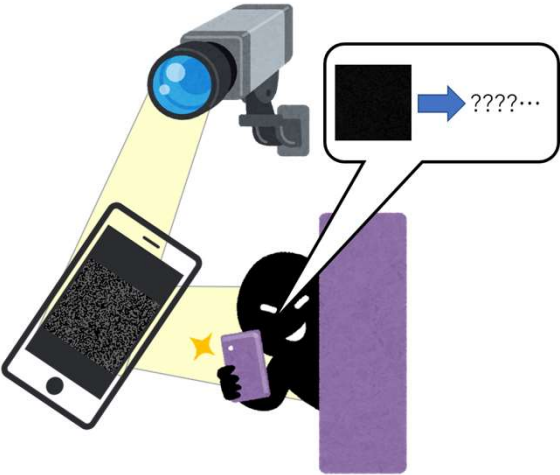


0	0	1	0	1	1	0	1	0	0
1	0	0	0	1	1	0	0	1	1
0	0	1	1	0	1	0	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	1	0	1	0	1	0	0	0
0	0	0	0	1	1	1	0	0	0
0	1	0	0	0	0	0	1	1	0
1	1	0	0	1	0	1	0	0	0
1	1	1	0	1	1	1	1	0	0

データ画像は0と1の2値データを白黒の正方形(セル)に変換したものの

OCCアップリンク:ディスプレイを用いた通信では画面のフレームレートが低く、照明のように高速で点滅できないため空間多重で1枚の画像に複数の異なる情報を配置した空間分割多重で送信データレートを向上させる。

研究目的



送信画像に複数の異なる情報を配置する空間分割多重によりデータレートを向上させると共にディスプレイを低輝度化することで受信を想定しない方向からの盗撮・復号を防ぎ、物理層におけるセキュリティを高める。



高輝度255の送信画像



低輝度95の送信画像

問題点:

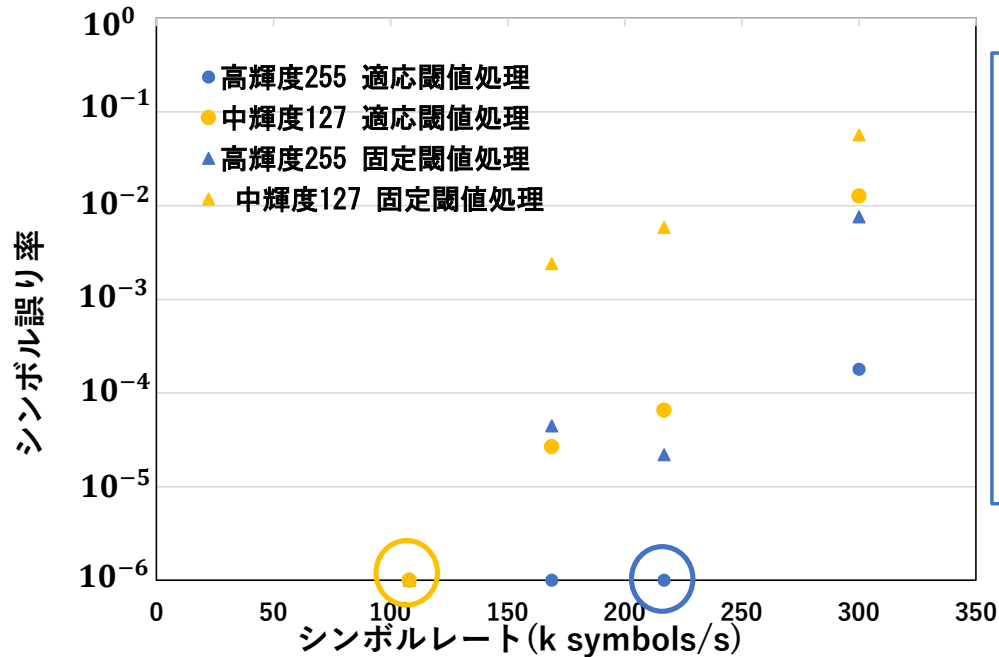
低輝度化すると受信画像でも白セルの明るさが大幅に下がるのに加えシンボルレートの増加に伴いシンボル間干渉が激しくなるため2つの要因によってデータ判別が困難になる。よって低輝度・高シンボルレートになるほど閾値をより正確に設定する必要がある。

解決策:

8近傍パターン毎に最適な閾値を設定し適応閾値処理の精度向上を図る。

これまでの研究経過

川出 他 「適応閾値処理による
空間分割多重OCCアップリンクの低輝度化」
電子情報通信学会総合大会, A-9-1, Mar. 2021.



これまでにLCDを用いた空間多重OCCアップリンクにおいて
適応閾値処理を用いることで

高輝度255では216.75kシンボル/秒、

中輝度127では108kシンボル/秒までエラーフリー通信を
実現している。

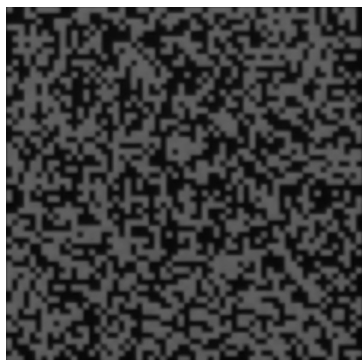
しかし、LCDではリフレッシュレートが遅く、低輝度画像が
正確に表示されておらず実験結果として不十分だった。

今回の課題:

今回はリフレッシュレートが比較的速いOLEDディスプレイで実験を行なう。
また、アルゴリズムを工夫することでより低輝度かつ高速な通信を実現する。

8近傍セルによる シンボル間干渉の影響

固定閾値



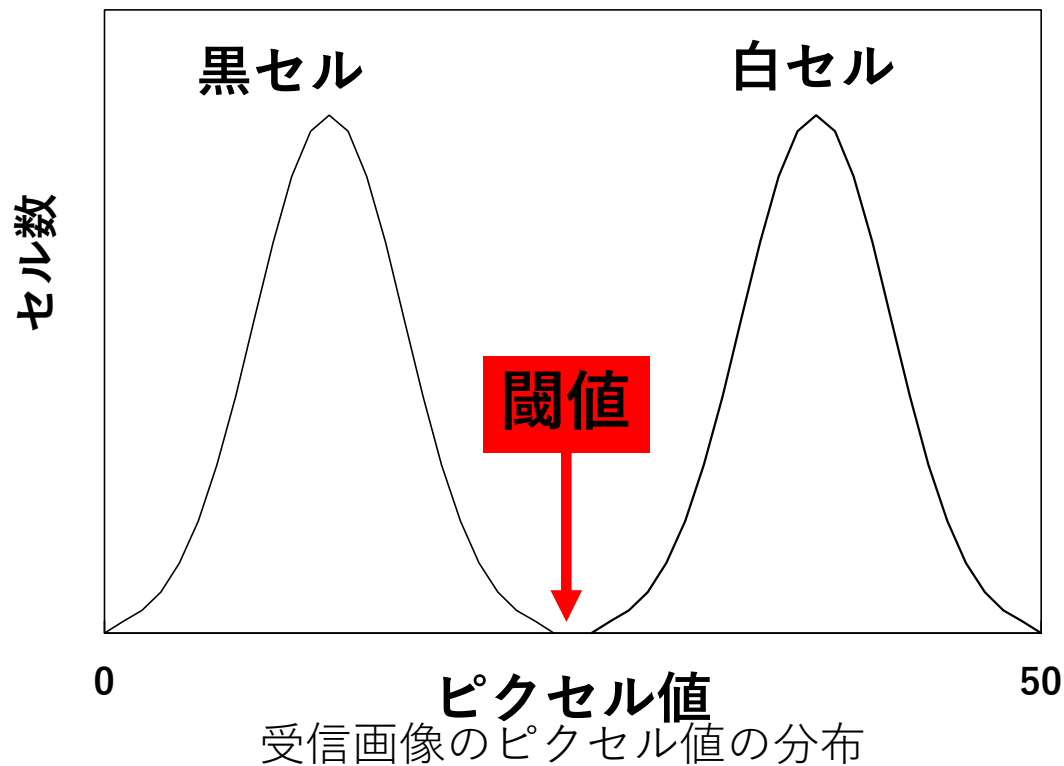
60 × 60セルの受信画像の例

- 受信画像を構成するピクセル1つの明るさの値(ピクセル値)
- ピクセル値は0(完全な黒)~255(完全な白)の値をとり、ピクセルが白色に近いほど値は大きくなる。白セルのピクセル値は大きく、黒セルは小さいため白セルと黒セルの判別基準となる値(固定閾値)を1つ設定する。

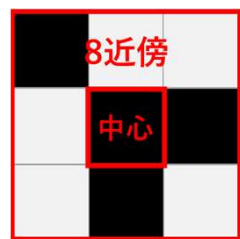
固定閾値

白セルとして判定

黒セルとして判定



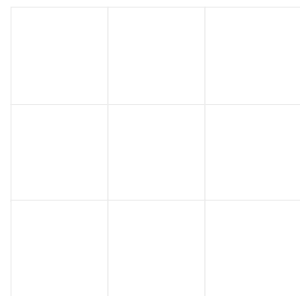
8近傍パターンによる シンボル間干渉



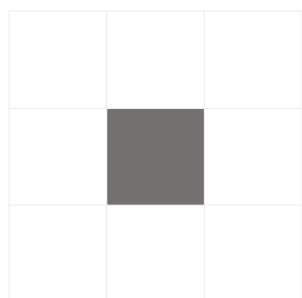
判定する中心セルを囲む周囲8セル(8近傍セル)の影響を受け、ピクセル値が変化する。



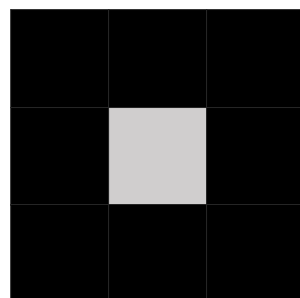
8近傍全てが黒の黒セル



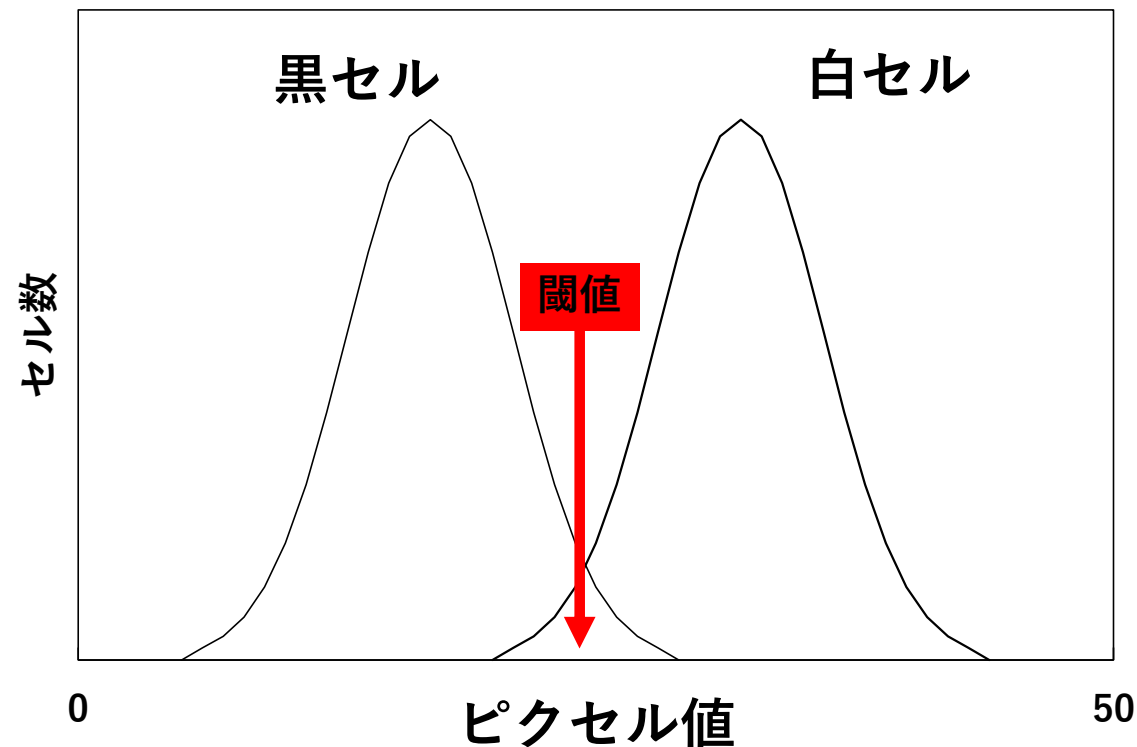
8近傍全てが白の白セル



8近傍全てが白の黒セルは
ピクセル値が大きくなる



8近傍全てが黒の白セルは
ピクセル値が小さくなる



受信画像のピクセル値の分布

黒セルの最大ピクセル値と白セルの最小ピクセル値が逆転した場合でも
正しくシンボル判定を行える方法が必要になる。

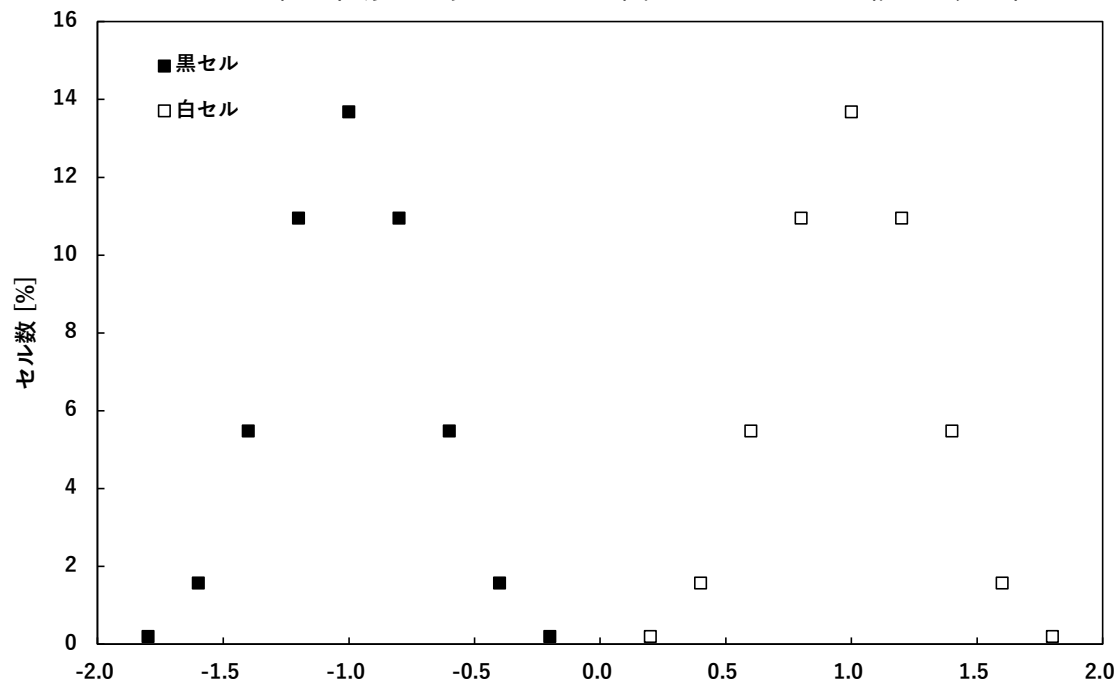
8近傍セルによるシンボル間干渉の計算モデル

p7	p8	p1
p6	p0	p2
p5	p4	p3

$$P_0 = \sum_{i=0}^8 p_i$$

シンボル間干渉を受けた中央セルのピクセル値 P_0 は中央セルのピクセル値を $p_0 = \pm 1$ 、8近傍セルからの干渉によるピクセル値の増減を $p_1 \sim p_8 = \pm x$ ($0 < x < 1$)とし、 $p_0 \sim p_8$ の総和で表される。

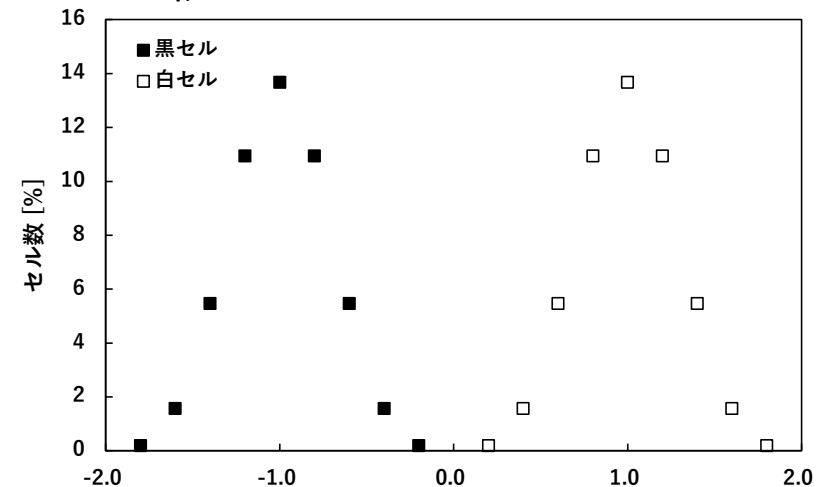
シンボル間干渉が少ない場合のピクセル値の分布



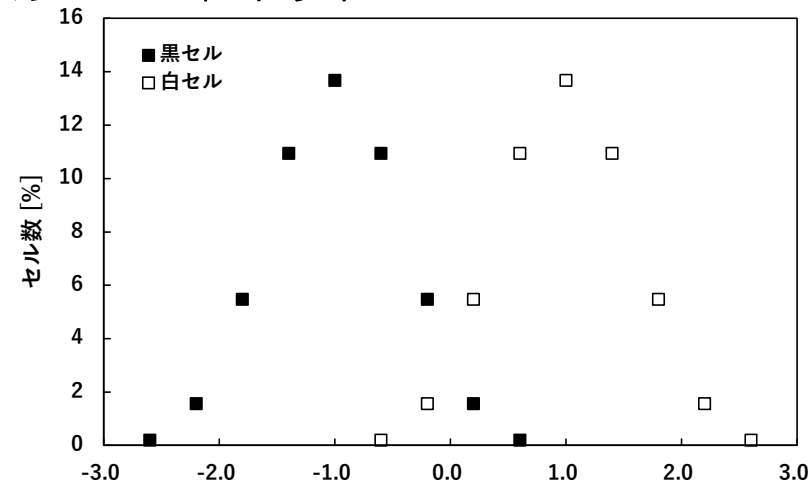
規格化された受信ピクセル値
黒セルは-1が基準

白セルは1が基準

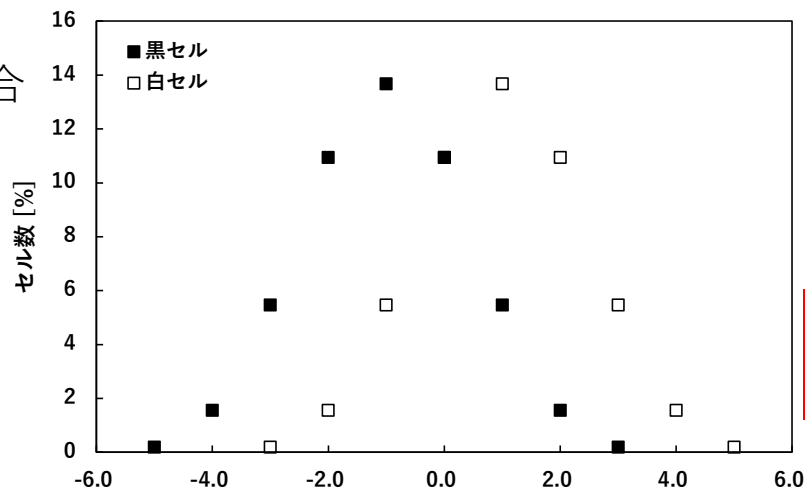
8近傍セルによるシンボル間干渉の計算



規格化された受信ピクセル値
シンボル間干渉が少ない場合
($p_1 \sim p_8 = \pm 0.1$)



規格化された受信ピクセル値
シンボル間干渉が中程度の場合
($p_1 \sim p_8 = \pm 0.2$)

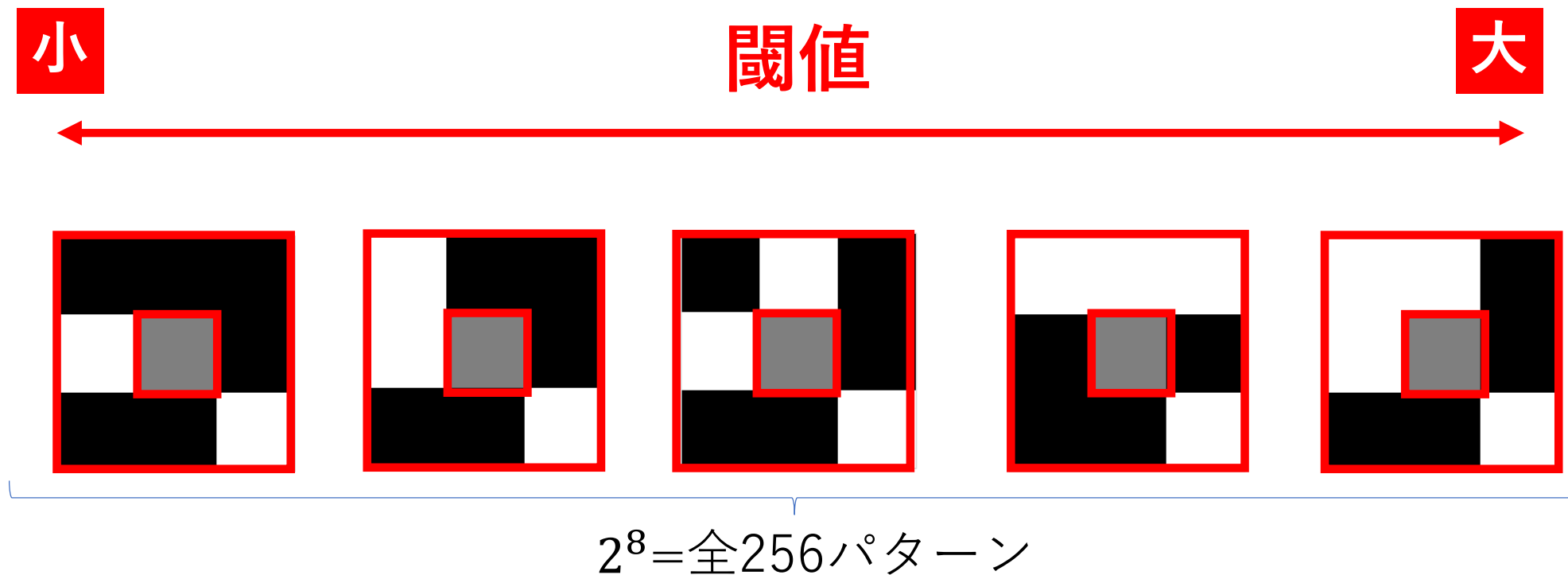


規格化された受信ピクセル値
シンボル間干渉が大きい場合
($p_1 \sim p_8 = \pm 0.5$)

**シンボル間干渉が大きくなると
固定閾値での判定が困難になる。**

適応閾値処理の原理

8近傍パターンごとの閾値



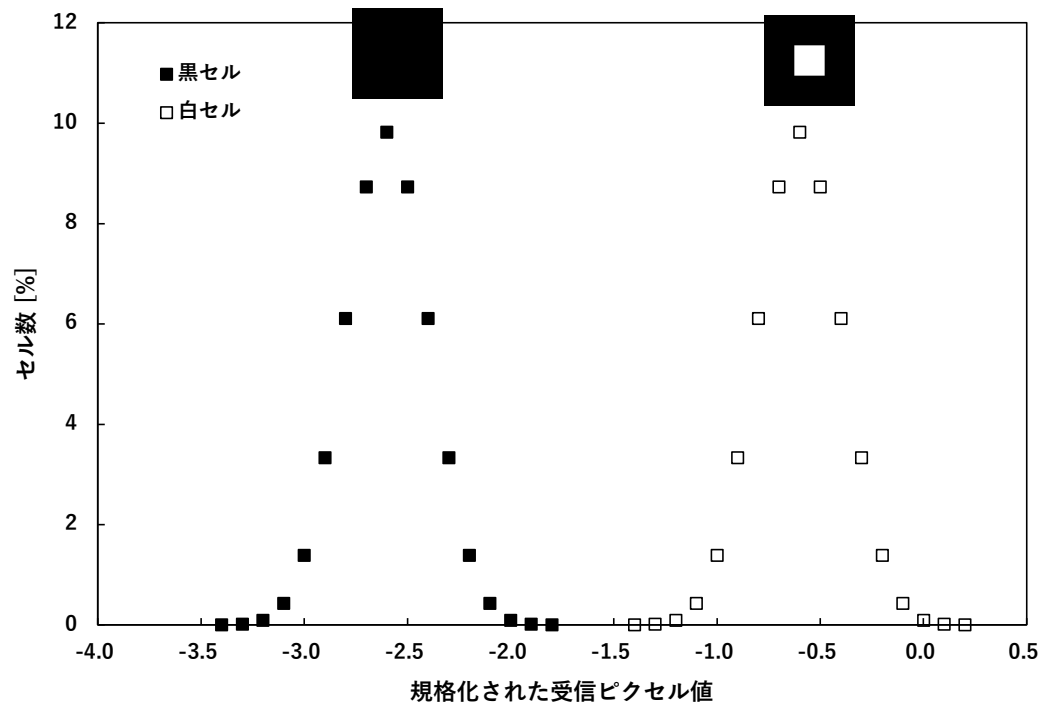
各8近傍パターン毎に固定閾値と同様に黒セルの最大値と白セルの最小値の中間値を閾値とし、256通りの閾値を設定する。

各パターンごとのシンボル間干渉の計算モデル

p21	p22	p23	p24	p9
p20	p7	p8	p1	p10
p19	p6	p0	p2	p11
p18	p5	p4	p3	p12
p17	p16	p15	p14	p13

$$P_0 = \sum_{i=0}^{24} p_i$$

8近傍全てが黒のセルのパターンのピクセル値の確率分布



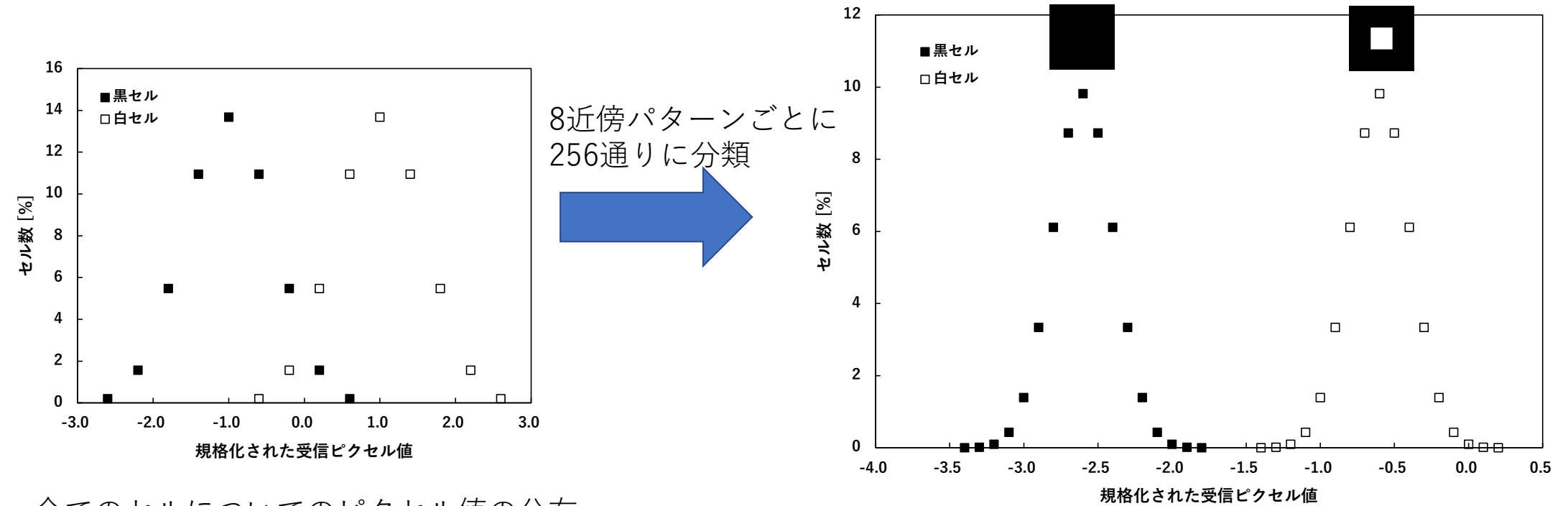
各パターンごとのシンボル間干渉は

$p_1 \sim p_8 = \pm x$ 、 $p_9 \sim p_{24} = \pm \frac{x}{4}$ とし、 $p_0 \sim p_{24}$ の総和で表される。

シンボル間干渉は距離の二乗に比例して減衰すると仮定する。

8近傍パターン毎のピクセル値分布

全てのセルを8近傍パターンごとに分類することで黒セルと白セルの分布を分けることができる。

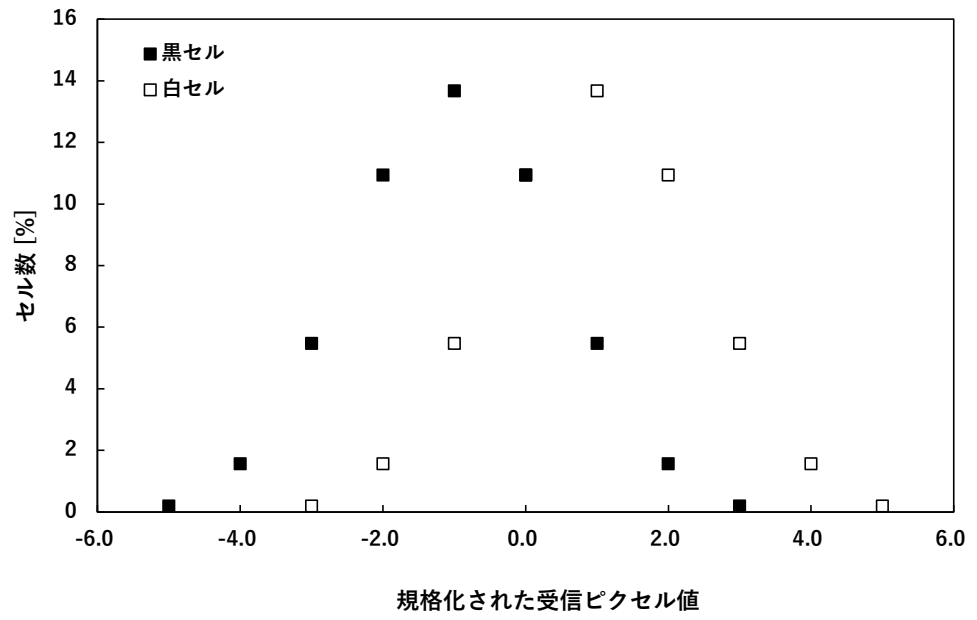


全てのセルについてのピクセル値の分布

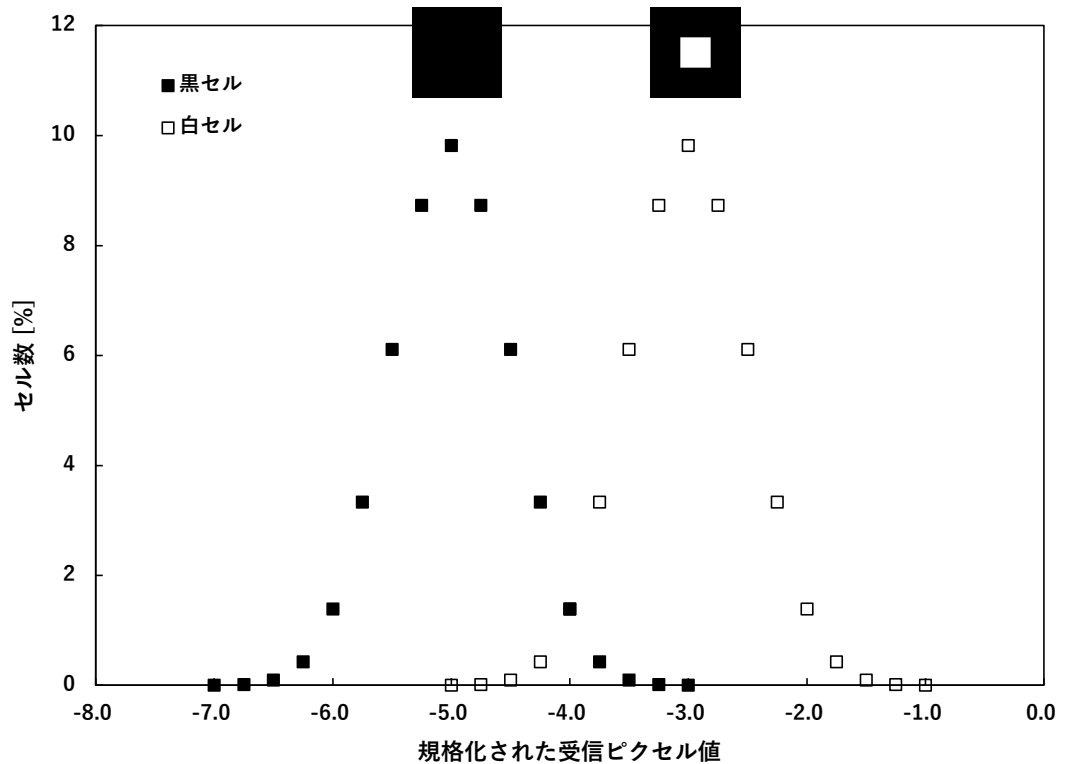
$$(p_1 \sim p_8 = \pm 0.2, p_9 \sim p_{24} = \pm 0.05)$$

8近傍全てが黒セルパターンのピクセル値の分布

適応閾値処理の限界



シンボル間干渉が大きい場合のピクセル値の分布



8近傍全てが黒のセルのパターンでのピクセル値の分布

$$(p_1 \sim p_8 = \pm 0.5, p_9 \sim p_{24} = \pm 0.125)$$

シンボル間干渉が大きくなり、分類したパターンにも重なりが出た場合
 適応閾値処理でもエラーが発生する。

適応閾値処理はシンボル間干渉が比較的少ない場合に有効である。15

画像の送信手順

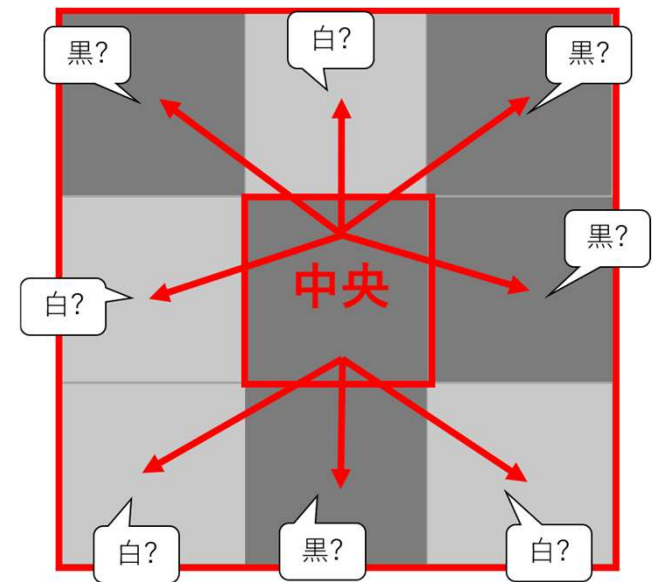
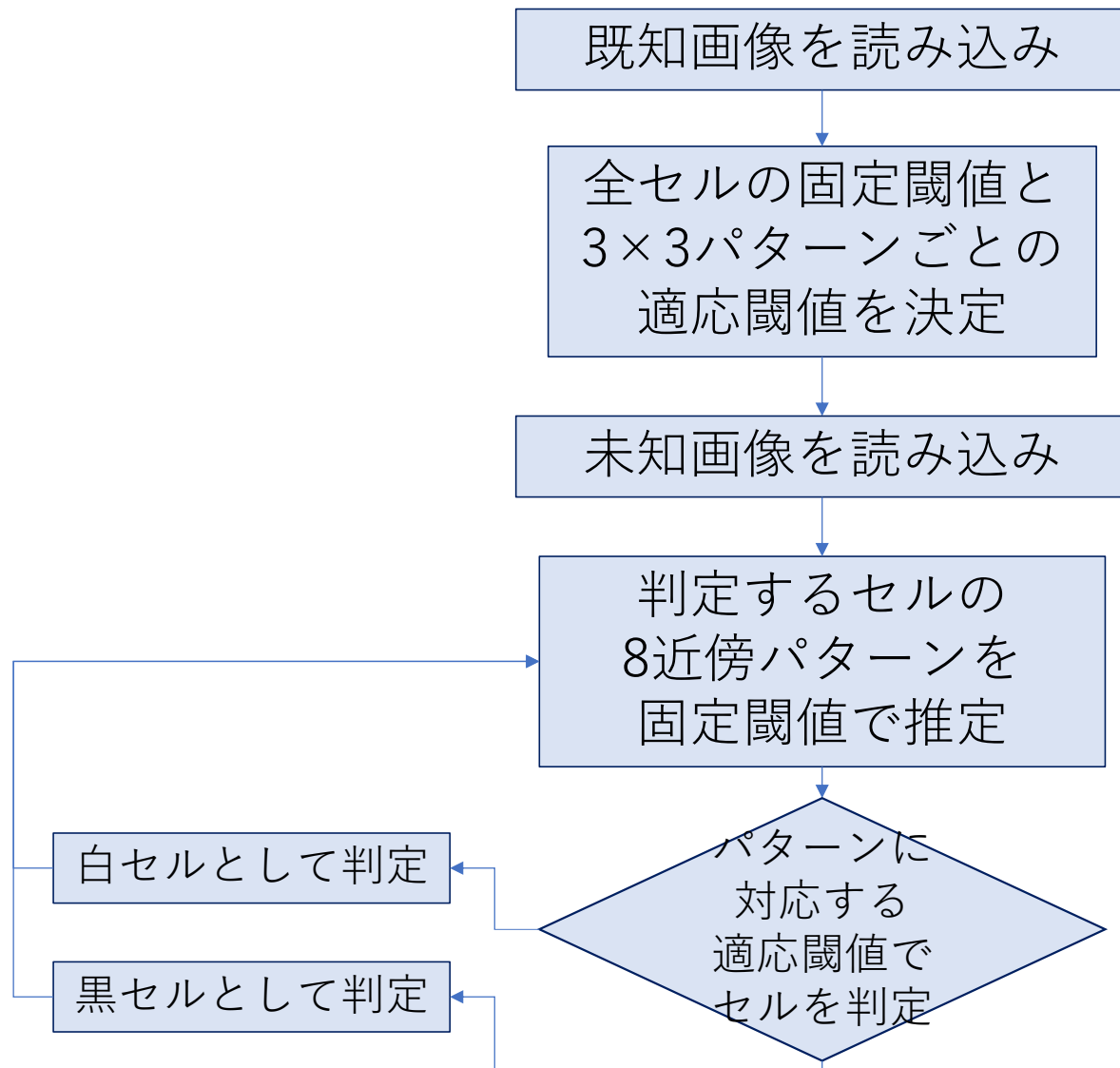
同セル数,同輝度で2種類の送信データ画像セットを用意



A. 白黒セルの順番,配置が判明している閾値を設定するためのプリアンブルとなる画像セット (既知画像)

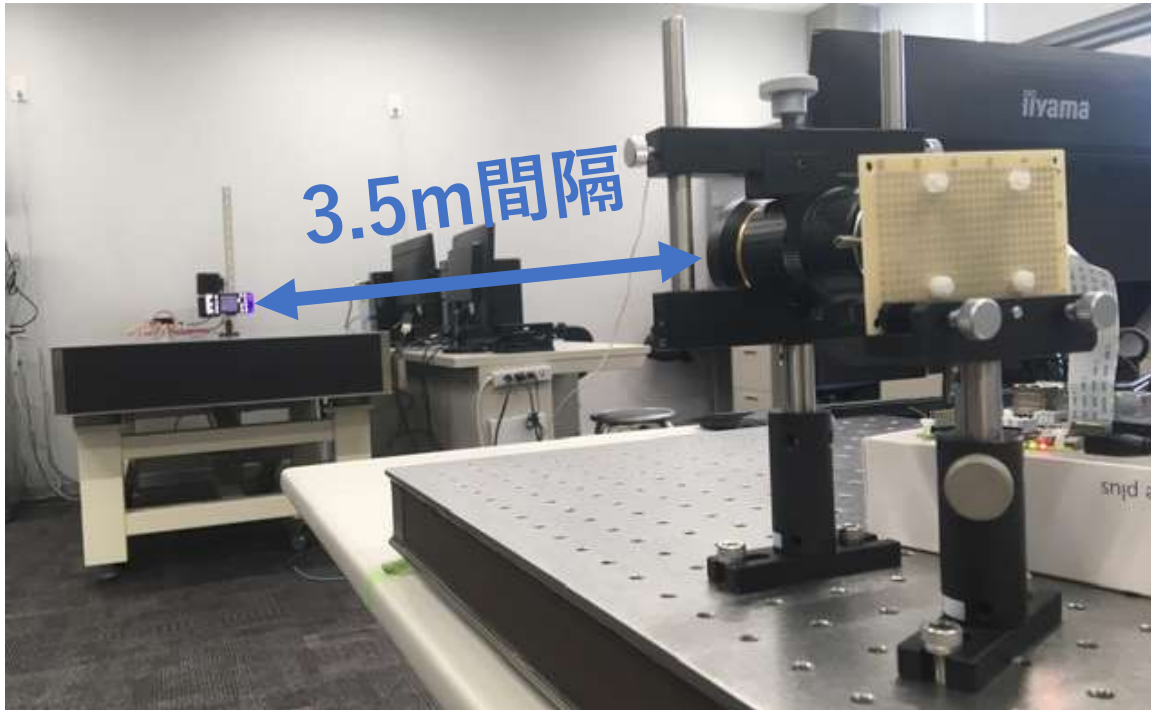
B. 閾値による判定を行いシンボル誤り率を算出するデータとなる画像セット (未知画像)

適応閾値処理のフローチャート

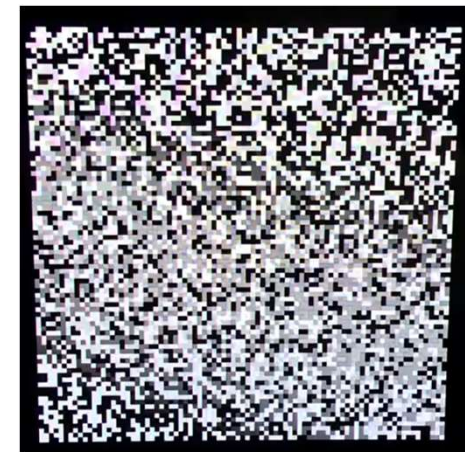


通信実験の条件

送受信機の諸元



送信機	受信機
スマートフォン ASUS-Zenfone7	イメージセンサ Sony IMX219
ディスプレイ 6.67インチOLED	レンズ焦点距離 5~50mm
送信画像解像度 600×600ピクセル	撮影画像解像度 640×480ピクセル
送信フレームレート 30fps	受信フレームレート 60fps



既知画像、未知画像の送信画像を切り替えて表示

A・Bともに送信情報はPRBS15でランダムに生成した。

プリアンブル

データ



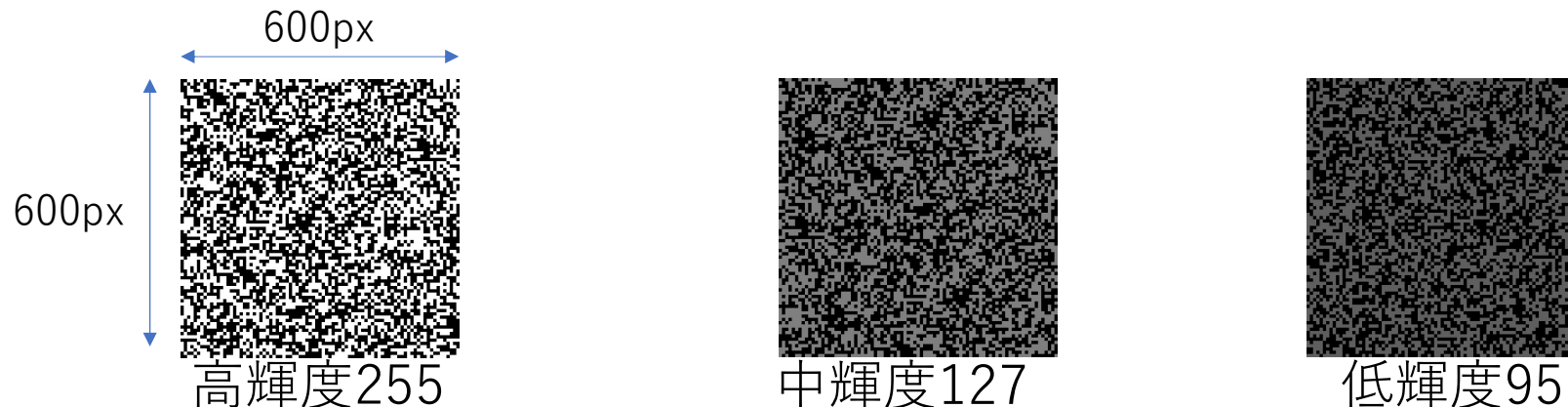
OLED上の送信画像(高輝度255,85×85セル)

送信画像のセル数・シンボルレートと輝度

通信速度の指標となる値として、**シンボルレート**を使用する。

送信画像1枚のセル数	シンボルレート
60×60セル(全3600セル)	108k symbols/s
75×75セル(全5625セル)	168.75k symbols/s
85×85セル(全7225セル)	216.75k symbols/s
100×100セル(全10000セル)	300k symbols/s

画像の大きさは全て600×600ピクセルで統一

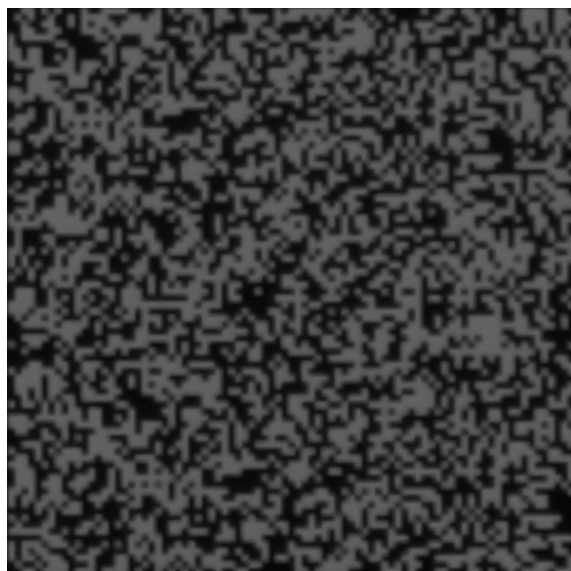


3通りの輝度の送信画像(85×85セル)

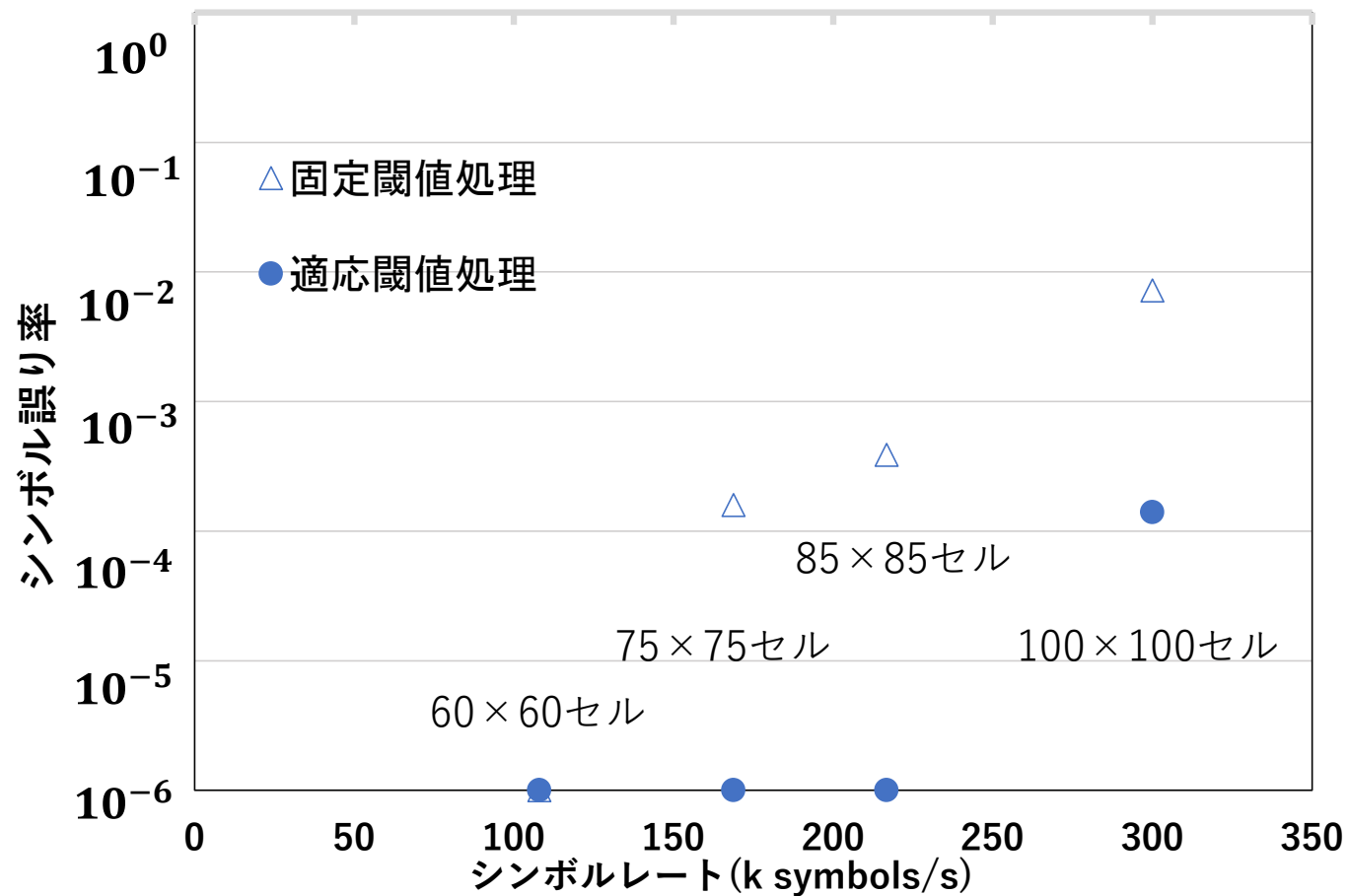
通信実験の結果

高輝度255での実験結果

距離:3.5m



85×85セルの受信画像



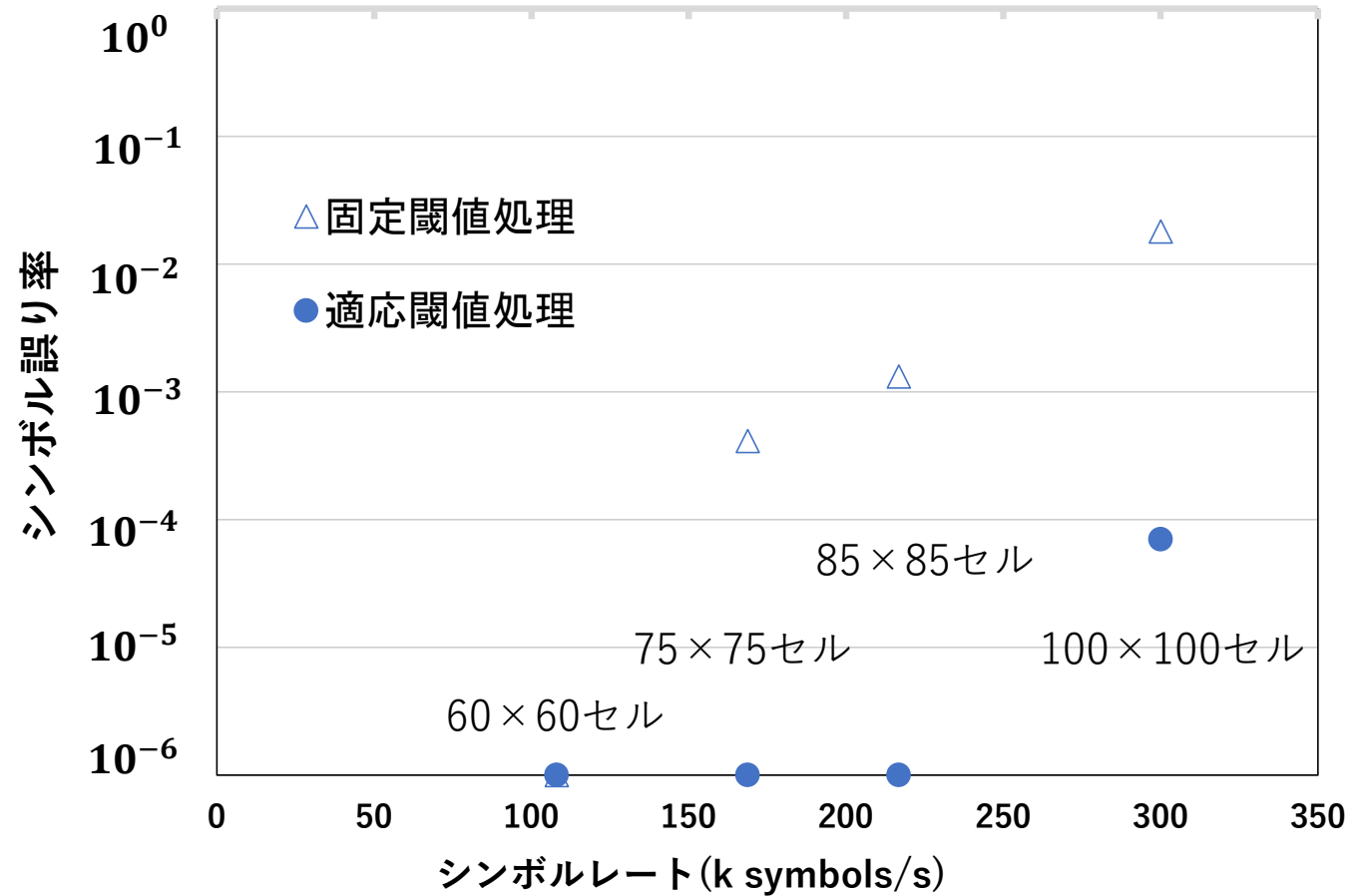
高輝度255では216.75k symbols/s (85×85セル)までエラーフリー通信を実現した。

中輝度127での実験結果

距離:3.5m



85 × 85セルの受信画像



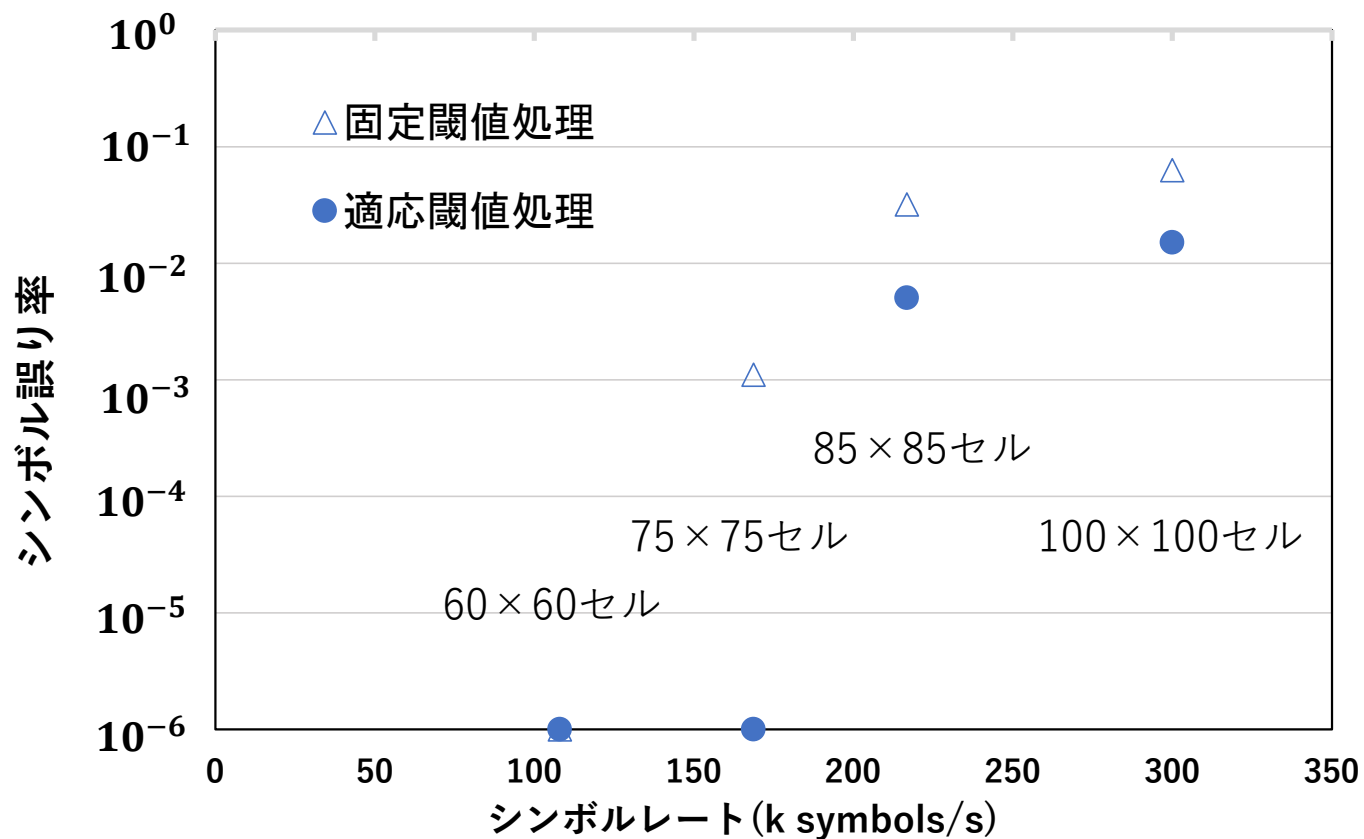
中輝度127では高輝度255と同じ216.75k symbols/s (85 × 85セル)までエラーフリー通信を実現し、シンボルレートを向上させることができた。

低輝度95での実験結果

距離:3.5m



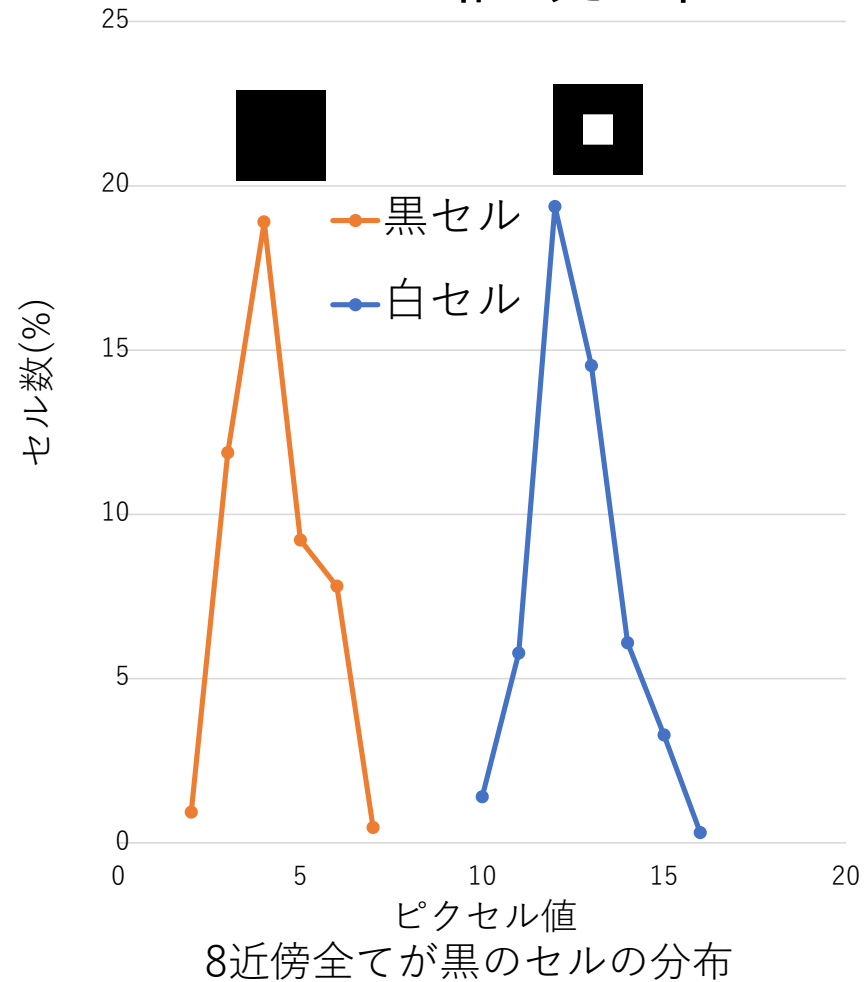
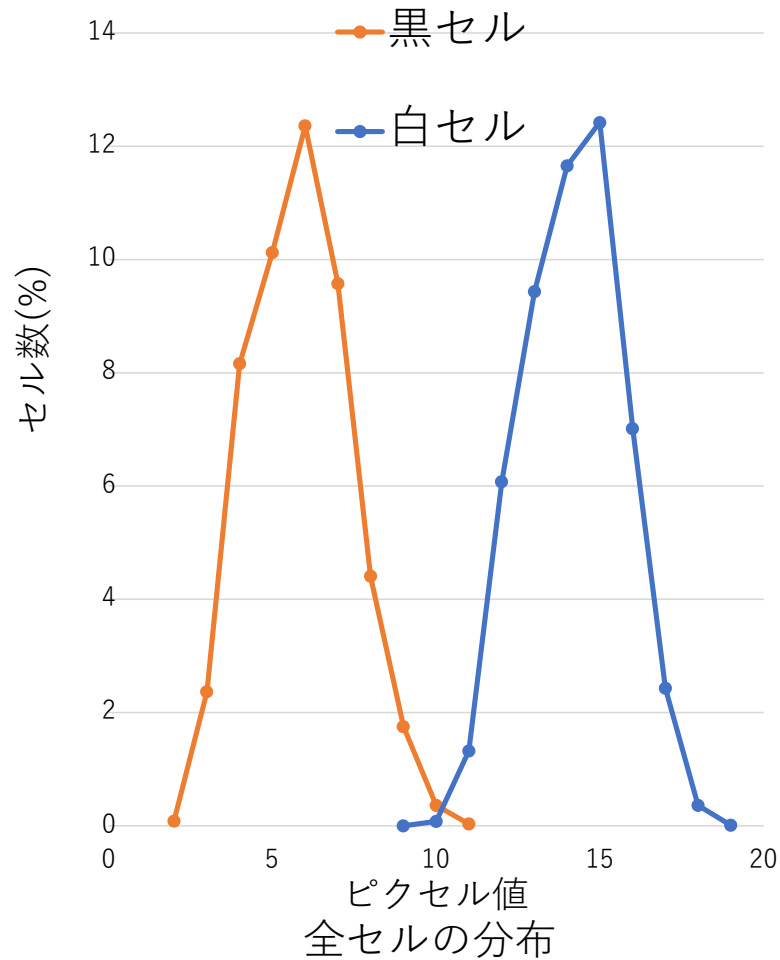
75×75セルの受信画像



低輝度95では168.75k symbols/s (75×75セル)までエラーフリー通信を実現し、シンボルレートを向上させることができた。

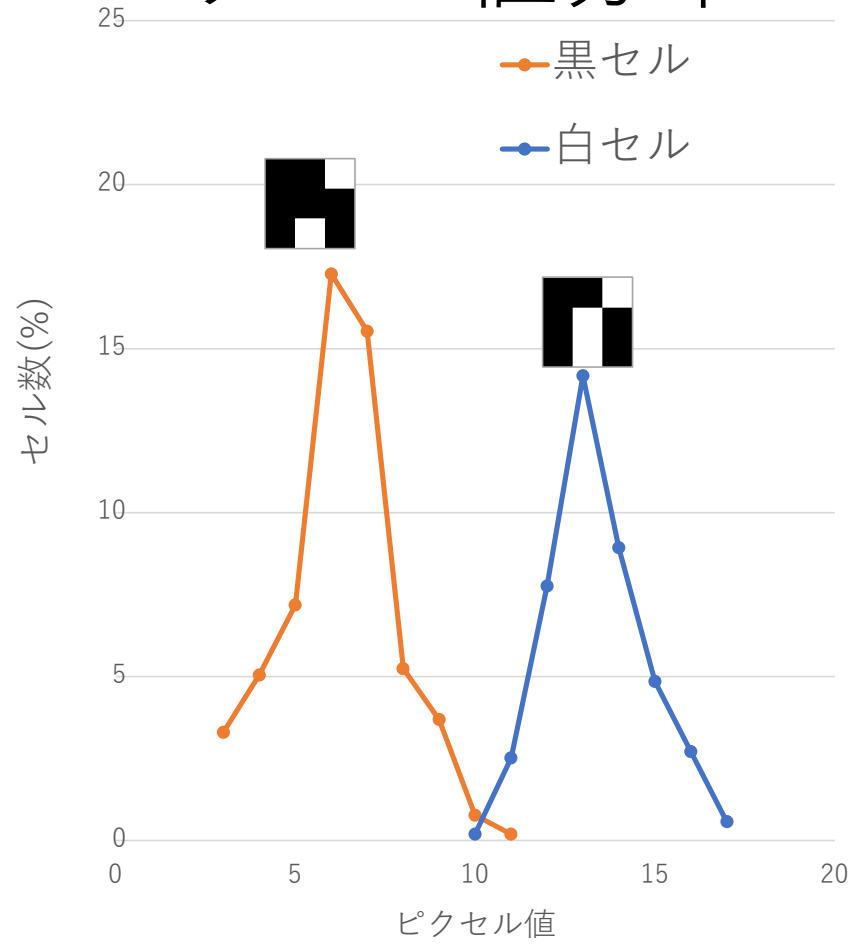
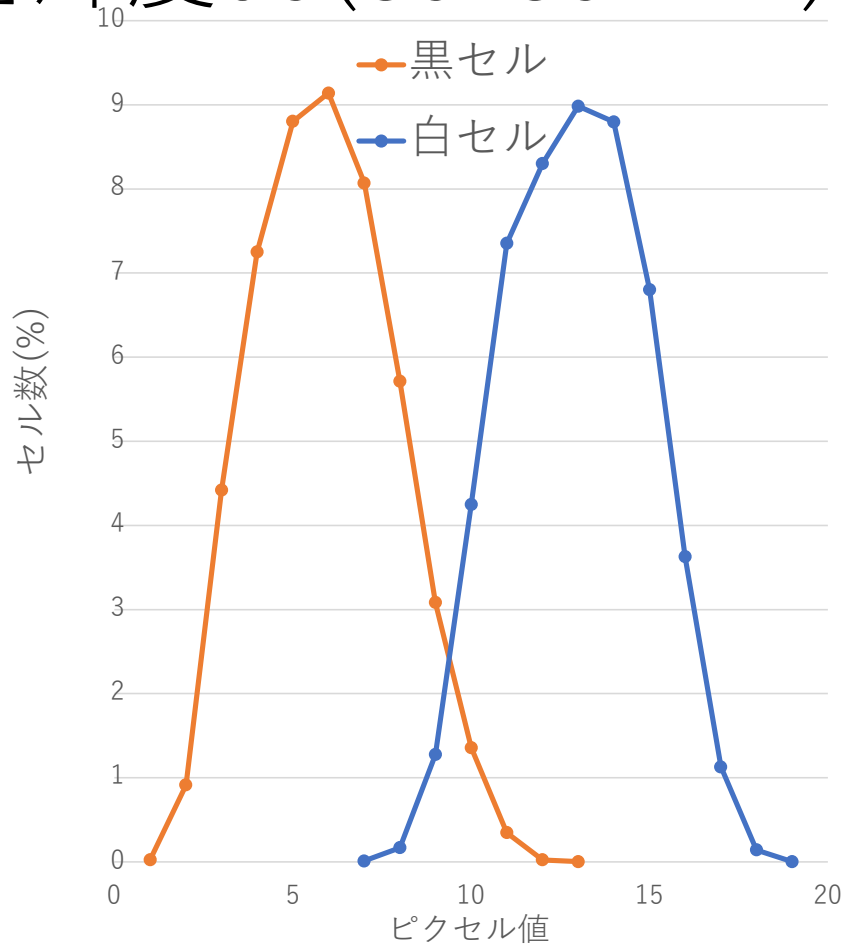
考察と改善実験

低輝度95(75x75セル)でのピクセル値分布



全セルについては白セル黒セルの分布重なるが、適応閾値処理を用いるとエラーフリーとなる。

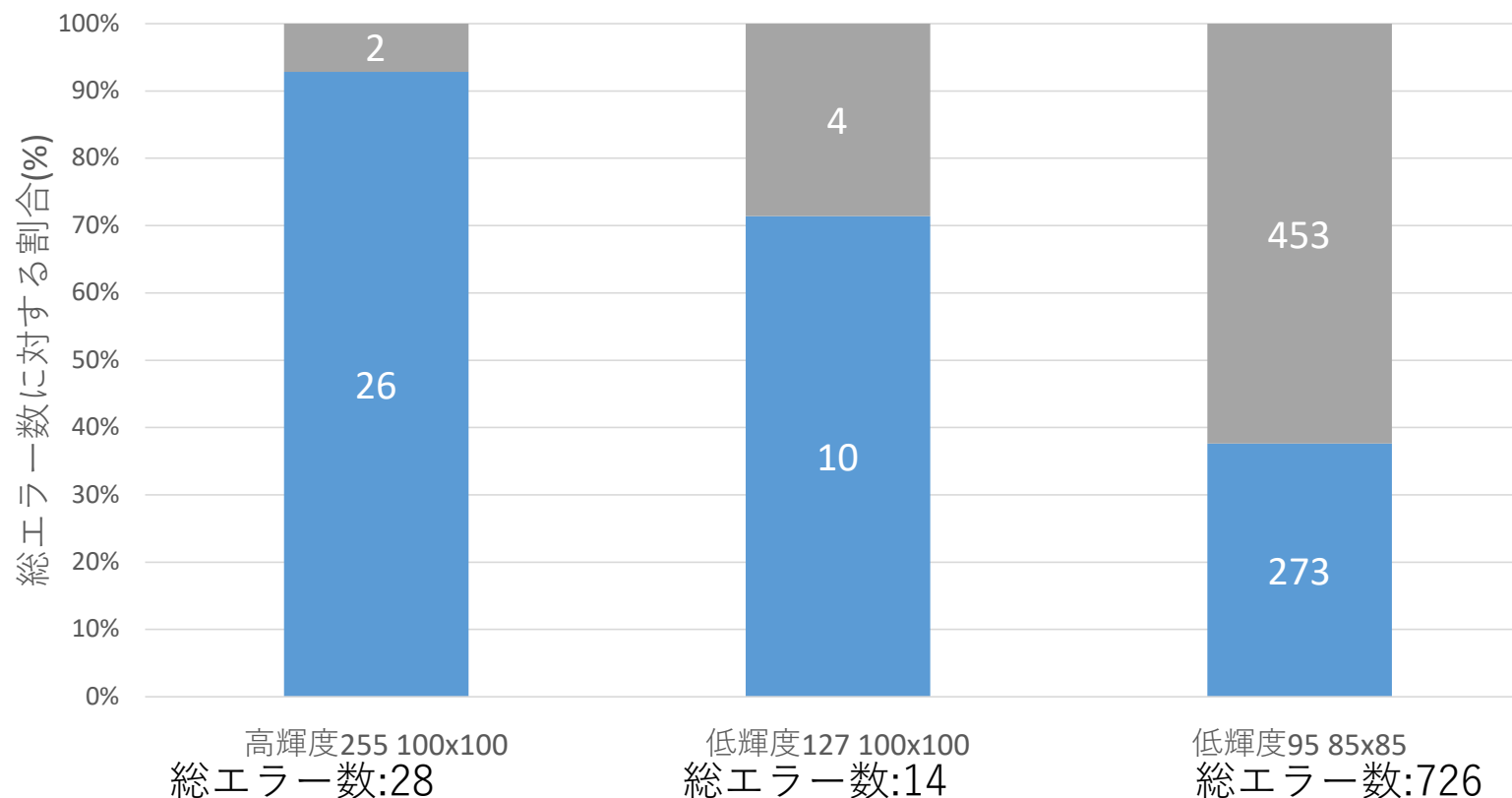
低輝度95(85x85セル)でのピクセル値分布



シンボル間干渉が大きく、分布が重なるパターンがあったため
適応閾値処理でも誤りが発生した。

8近傍セルに固定閾値を用いた場合の誤判定率

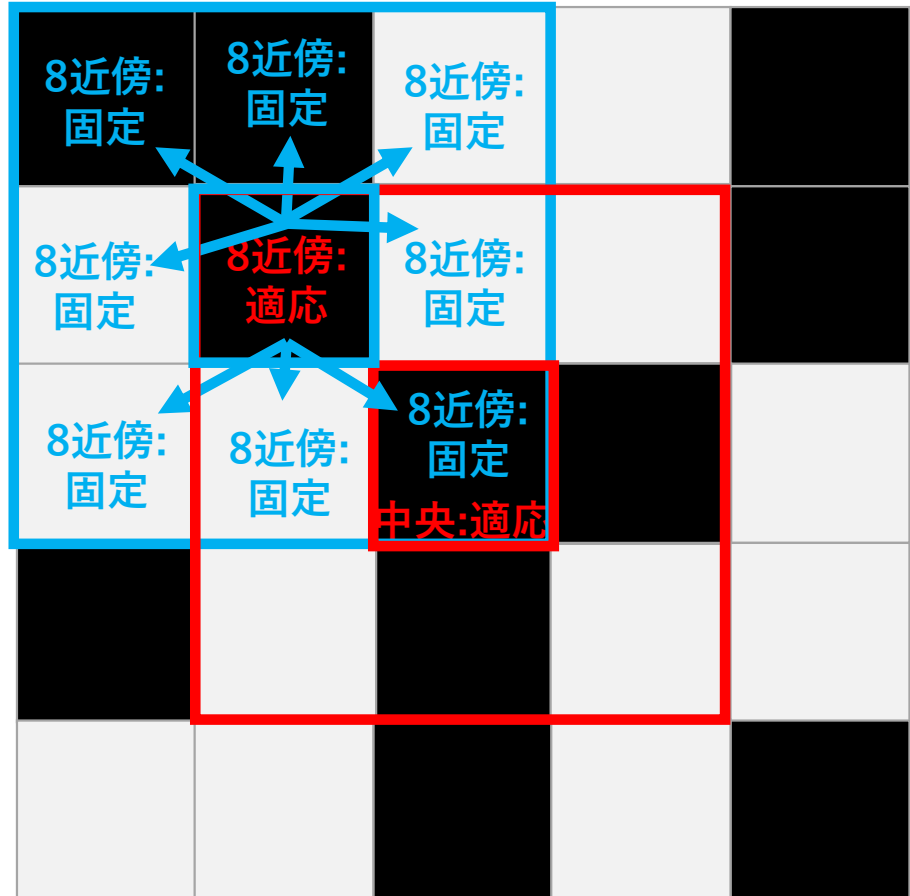
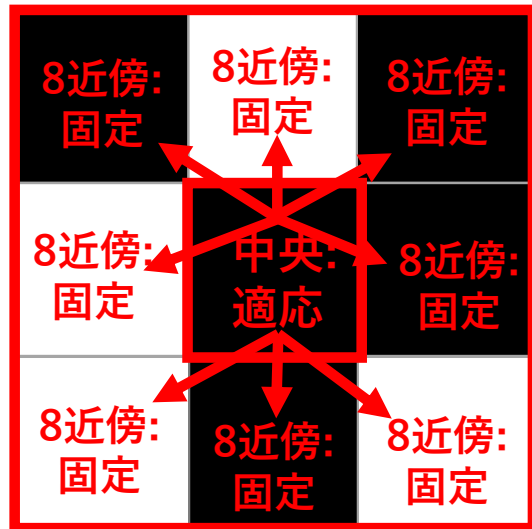
- 分布が重なることによるエラー(パターン判定は正しい)
- 固定閾値での8近傍パターン誤判定によるエラー



8近傍パターンを誤判定したことによるエラーが含まれているが、これらは8近傍パターン判定に適応閾値を用いることで改善できる可能性がある。

改善実験: 8近傍セルに適応閾値処理を用いた場合

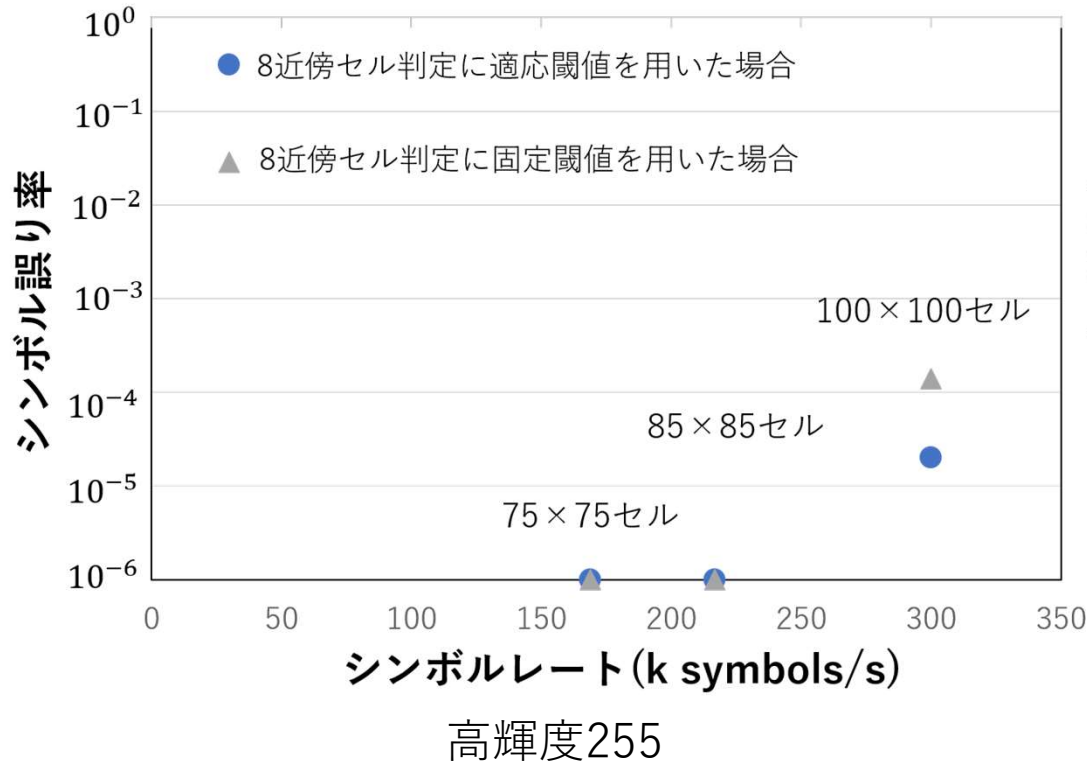
各8近傍セルのさらに周りの8近傍を固定閾値で判定し、適応閾値を用いることでパターン判定の精度を上げる。



8近傍パターンの判定に固定閾値を用いた場合

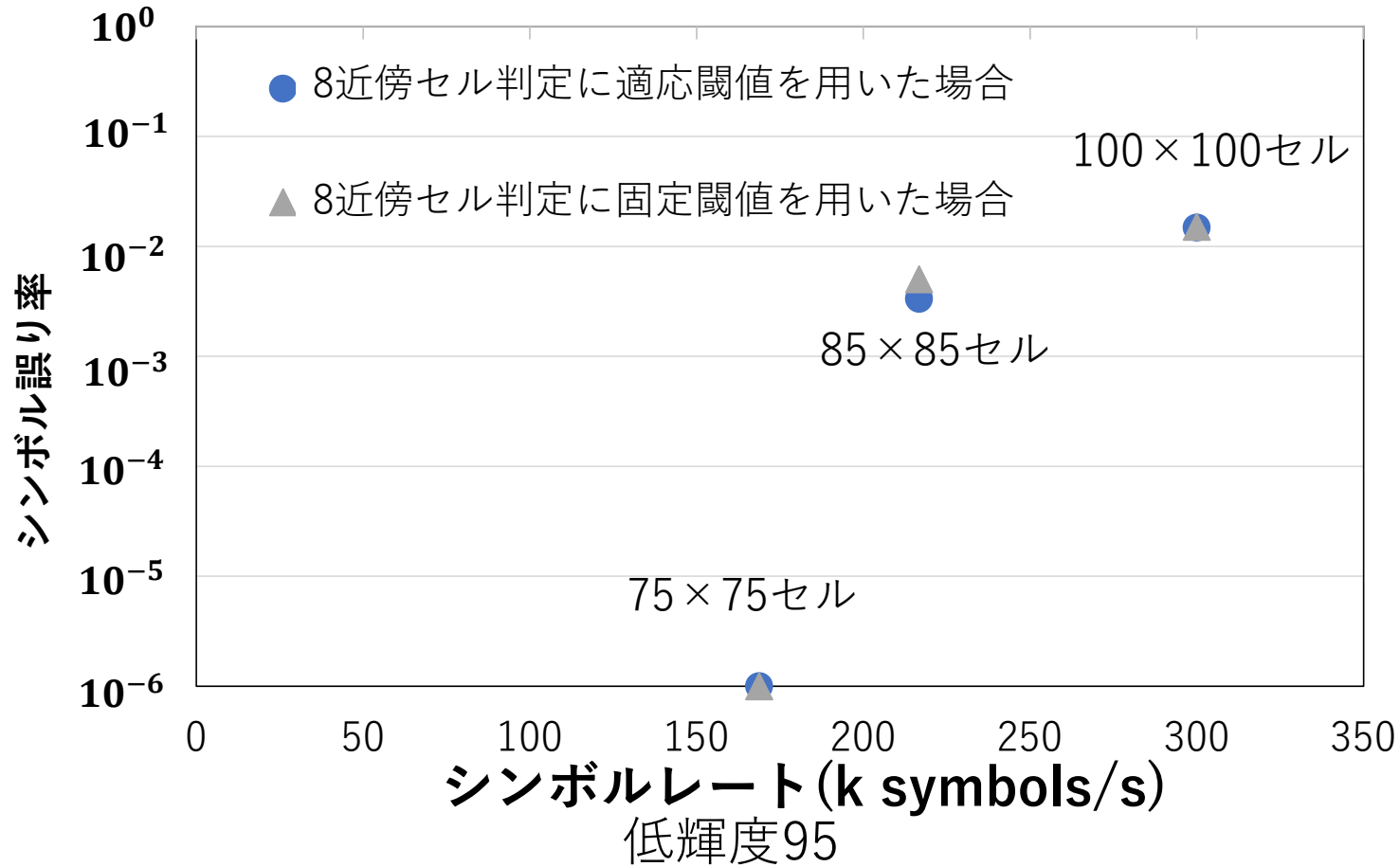
8近傍パターンの判定に適応閾値を用いた場合 29

改善実験結果



8近傍パターンの判定を誤ったことによるエラーが解消された。30

改善実験結果



低輝度95では白セルと黒セル分布の重なりによるエラーが多く、パターン誤判定によるエラーを解消してもエラー率は大きく低減しない。

結論

- OLEDディスプレイを用いた空間多重OCCアップリンクにおいて8近傍パターン毎に最適なしきい値を設定する適応閾値処理によってデータレートの向上と低輝度化を実現した。
- 高輝度255,中輝度127(216.75kシンボル/秒)に対し、低輝度95では168.75kシンボル/秒までエラーフリー通信を実現した。
- 8近傍パターン判定を適応閾値で行うことで、さらにシンボル誤り率を低減することができた。

今後の課題:

適応閾値処理での3x3セルでのパターン判定を5x5セルに拡大する。

ご清聴ありがとうございました。